

ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ КВАЗИТРЕХМЕРНЫХ НЕВЯЗКИХ ТЕЧЕНИЙ И ПРОГРАММЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

Милешин В.И., Орехов И.К., Старцев А.Н.
ГНЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

Представлены: программный комплекс и результаты перепроектирования лопаточных венцов, демонстрирующие применимость данного программного комплекса для повышения кпд ступеней на $1.5 \div 2\%$. Программное обеспечение и способы перепроектирования разработаны в ЦИАМ.

Современная тенденция уменьшения числа ступеней в компрессоре реализуется через применение ступеней с высокой степенью повышения полного давления. Существуют, по крайней мере, две концепции создания компрессоров с меньшим количеством ступеней, применимых как к созданию компрессоров низкого давления (КНД), так и компрессоров высокого давления (КВД). Первая из них – использование первой ступени с очень большой степенью сжатия, при этом нагрузка последующих ступеней понижена. Вторая – применение умеренно нагруженных ступеней, с напорностью ступени, увеличивающейся от начала к середине компрессора, а затем – уменьшающейся. Второй подход является традиционным и считается дающим более предпочтительный результат. Потому что комбинация высоких скоростей и высокой напорности в первой ступени приводит к повышенным потерям полного давления. Тем не менее, последние достижения ЦИАМ в перепроектировании широкохордных высоконагруженных лопаток КНД и КВД указывают на перспективность первой концепции проектирования. Следует также отметить, что современная тенденция к созданию коротких камер сгорания требует понижения числа M на выходе из компрессора до значений $0.28 \div 0.3$, а значит и дополнительного нагружения последних ступеней КВД.

В ЦИАМ имеется ряд экспериментально исследованных высоконапорных ступеней, поэтому естественно начать выработку новых принципов с перепроектирования этих ступеней. Принципы перепроектирования разнятся для каждого типа ступеней и некоторые из них будут представлены ниже.

Авторы применили два различных подхода к перепроектированию сверхзвуковых рабочих колес (РК) с целью

повышения кпд. Первый состоит в применении программы решения обратной задачи газовой динамики в слое переменной толщины на поверхности вращения S_1 для перепроектирования профилей лопатки ротора сверхзвукового вентилятора во втулочном и периферийном сечениях. Заметим, что эта обратная задача решается для невязкого потока. Для сверхзвукового потока со скачками уплотнения в периферийном сечении лопатки цель перепроектирования обычно состоит в уменьшении числа M перед скачком (суперкритические профили) и замене прямого скачка уплотнения совокупностью скачков. Осуществленное таким образом перепроектирование периферийного сечения лопатки, подтвержденное интегрированием трехмерных уравнений Навье-Стокса, дает в результате уменьшение зоны отрыва, индуцированной скачком уплотнения, сопровождаемое, однако, снижением нагруженности периферийного сечения лопатки. Это уменьшение нагруженности является нежелательным, поэтому, чтобы сохранить степень повышения полного давления ротора, нагруженность втулочного сечения лопатки была увеличена. Решение обратной задачи в слое переменной толщины обеспечивает одновременное повышение нагруженности профиля и понижение максимального числа M на стороне прорезания на 0.1 во втулочном сечении. В результате кпд ротора повысился на 1% при сохранении расхода и степени сжатия таких как в исходном роторе.

Второй подход состоит в использовании обратной задачи газовой динамики осесимметричного невязкого течения на поверхности S_2 . В качестве примера использовалась высоконапорная сверхзвуковая ступень КНД (степень сжатия ~ 2.1). Основная цель перепроектирования в данном примере состояла в повышении лобовой производительности ступени на 7% и, если возможно, кпд. Для повышения производительности была понижена втулка рабочего колеса и направляющего аппарата. Расход повысился, а чтобы получить требуемую степень повышения полного давления, была повышена нагруженность сечений лопатки РК от втулки до 75% высоты лопатки. Чтобы повышение нагруженности не вызвало нежелательного возрастания градиентов давления, авторы удлинили хорду лопатки в этих сечениях, что придало лопатке характерную стреловидную форму. Дополнительная нагруженность лопатки была выбрана так, чтобы требуемые степень повышения полного давления и расход были получены на пониженных оборотах ($\bar{n} = 97\%$). В результате получилось снижение на 0.1 числа M перед скачком и снижение интенсивности и сглаживание скачка уплотнения в окрестности задней кромки лопатки. В результате кпд ступени повысился на 1% в широком

диапазоне частот вращения ($\bar{n} = 80 \div 97\%$).

Повышение кпд ступени определяется не только улучшением течения в рабочем колесе. При перепроектировании следует обращать внимание и на течение в направляющем аппарате (НА). Во-первых, на максимальных оборотах направляющий аппарат определяет рабочую точку ротора, а во-вторых, поток, выходящий из ротора, имеет большую около- или даже сверхзвуковую скорость на втулке направляющего аппарата, поэтому интенсивное торможение потока в НА индуцирует вязкий отрыв на втулке. Отрывная зона может занимать значительную часть поверхности разрежения лопатки направляющего аппарата. Чтобы повысить кпд ступени и расширить диапазон ее устойчивой работы, авторы предприняли успешную попытку устранить указанный отрыв потока. Путем решения обратной задачи на поверхности S_1 для втулочной решетки профилей удалось лишь несколько снизить максимальную скорость потока на стороне разрежения профиля, однако отрыв потока не исчез. Тем не менее, стала понятна причина отрыва потока - излишняя нагруженность втулочного сечения лопатки. Отрыв был ликвидирован после того, как была изменена меридиональная форма втулки, что придало лопатке стреловидную форму. То, что отрыв вязкого потока исчезнет, стало понятно уже из расчета трехмерного течения невязкого газа, т.к. число M на выходе из перепроектированной втулочной решетки стало выше на 0.1 по сравнению с исходной. Последующий расчет вязкого потока в ступени показал повышение кпд ступени еще на 1% в диапазоне частот вращения $\bar{n} = 85 \div 97\%$

В следующем объекте - перспективном сверхзвуковом роторе первой ступени КВД, лопатки которого являются широкохордными, - относительная скорость потока сверхзвуковая по всей высоте лопатки. Степень повышения полного давления в ступенях такого типа высока и составляет, как правило, $2.5 \div 3$. Основным преимуществом широкохордных лопаток РК является высокий кпд, достигаемый за счет подвода работы посредством поворота потока, а не в интенсивных скачках уплотнения, как в рассмотренной выше первой ступени КНД. Поэтому при проектировании таких РК следует обеспечить безотрывное течение в межлопаточном канале. Обычно, этого достичь не удастся, так как в роторах таких ступеней, как правило, число M на периферии превышает 1.4 и имеет место протяженный отрыв вязкого потока из-под скачка уплотнения, располагающегося в окрестности горла межлопаточного канала на режиме максимума кпд. Отрывная зона занимает почти четверть проходного сечения канала в углу, образованном периферией и стороной разрежения лопатки.

В ходе расчетов было обнаружено, что естественное стремление снизить число M перед скачком и, тем самым ослабить, а то и устранить, отрыв приводит к возникновению колебательного режима течения: устранение скачка в горле приводит к исчезновению отрыва, это вызывает увеличение расхода, что в свою очередь влечет за собой возникновение интенсивного скачка за горлом с последующим интенсивным отрывом потока, который снова перемещает скачок в область горла. По мере перемещения к горлу скачок ослабляется, отрывная зона исчезает, и процесс повторяется.

Ранее спроектированная в ЦИАМ ступень КВД послужила прототипом для создания исходной ступени, кпд которой должен был быть повышен. Ослабления отрыва и повышения кпд ступени на 2% удалось достичь за счет уменьшения изгиба профилей по всей высоте лопатки РК, введения стреловидности лопатки РК на периферии, а также раскрытия HA на 5° . Последнее мероприятие позволило сохранить степень сжатия ступени, уменьшившуюся в результате уменьшения изгиба лопатки РК.

Применение обратной задачи на поверхности S_1 для случая транс- и дозвуковых венцов (средние и последние ступени КНД и КВД) имеет гораздо меньше ограничений, чем для случая сверхзвуковых венцов. Здесь следует сказать, что основной трудностью решения обратной задачи на поверхности S_1 является выбор такого изменения распределения статического давления на поверхности профиля, чтобы соответствующий профиль решетки оказался замкнутым и не имел самопересечений. Чтобы преодолеть эту трудность простейшим способом, авторы изменяли статическое давление только на одной стороне профиля (либо на стороне разрежения, либо на стороне давления), а вторая сторона профиля определялась из условия сохранения распределения толщины профиля вдоль его хорды. Как правило, такой прием эффективен, однако не исключены случаи (и в данной работе такой случай рассмотрен), когда для получения благоприятного распределения давлений приходится выбирать иное распределение толщины профиля и сдвигать максимум толщины профиля назад.

В заключение следует еще раз отметить подтвержденную результатами данной работы высокую эффективность программного комплекса ЦИАМ как рабочего инструмента для проектирования и последующего исследования перспективных высоконапорных до-, транс- и сверхзвуковых ступеней компрессоров НД и ВД. Приведенные в работе конкретные примеры проектирования показывают возможность повышения расчетного кпд существующих высоконапорных ступеней на 1.5÷2%.